



⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑰ Patentschrift  
⑩ DE 197 27 573 C 1

⑯ Int. Cl. 6:  
B 23 K 26/00  
A 61 F 9/013  
// G02C 7/04

⑲ Aktenzeichen: 197 27 573.7-34  
⑳ Anmeldetag: 28. 6. 97  
㉑ Offenlegungstag: -  
㉒ Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 20. 5. 98

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

㉓ Innere Priorität:  
196 44 664. 3 26. 10. 96

㉔ Patentinhaber:  
Aesculap Meditec GmbH, 07745 Jena, DE

㉕ Vertreter:  
Pfeiffer, R., Dipl.-Phys. Fachphys. f. Schutzrechtsw.,  
Pat.-Anw., 07743 Jena

㉖ Erfinder:  
Kühnert, Jürgen, Dipl.-Phys., 07747 Jena, DE;  
Mäusezahl, Holger, Dipl.-Ing., 07745 Jena, DE;  
Pieger, Stefan, Dipl.-Ing., 90530 Wendelstein, DE;  
Schröder, Eckhard, Dipl.-Phys., 90542 Eckental, DE

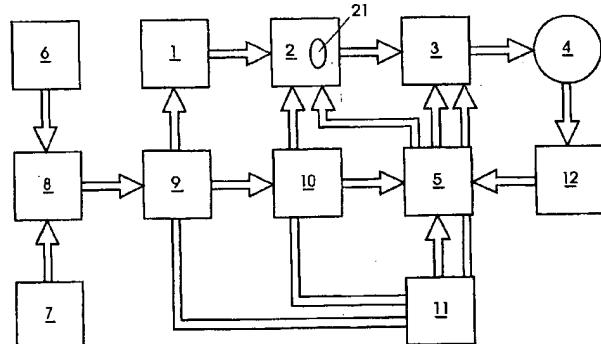
㉗ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:

US 55 20 679 A  
EP 04 12 189 A1

UNKROTH, A., u.a.: "Corneal Surgery by two-dimensionally scanning of a low-energy excimer laser beam". In: SPIE, Vol. 2126, 1994, S.217-229;

㉘ Vorrichtung und Verfahren zur Formgebung von Oberflächen, insbesondere von Linsen

㉙ Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Formgebung von Oberflächen, insbesondere von Linsen, vermittels einer Laserabtragung der Oberflächen. Bevorzugt findet die Erfindung Anwendung bei der Photo Refraktiven Keratotomie und ophthalmologisch exakten Formung von Kontaktlinsen. Die Aufgabe der Erfindung, eine Lösung anzugeben, die gewährleistet, daß bei einem plötzlichen Oberflächenbearbeitungsabbruch wenigstens eine akzeptable Teilkorrektur der zu bearbeitenden Oberfläche vorliegt, wird dadurch gelöst, daß die Vorrichtung einen zum Laserscanning eingesetzten gepulsten Laser (1), eine Strahlformungseinheit (2) und eine Laserstrahlablenkeinheit (3), die den Laserstrahl auf eine zu bearbeitende Oberfläche (4) ablenkt, enthält, wobei die Laserstrahlablenkeinheit (3) und die Strahlformungseinheit (2) von einer Ansteuereinheit (5) durch das Zusammenwirken einer ersten (6) und zweiten Eingabeeinheit (7), einer Berechnungseinheit (8), der die Daten der ersten und zweiten Eingabeeinheiten (6; 7) zugeführt werden, eines Blockgenerators (9), dem die in der Berechnungseinheit (8) gewonnenen Daten zugeführt werden und in dem die Einzellaserschusskoordinaten zur Abtragung jeweils einer beliebig vorgebbaren abzutragenden Einzeloberflächenschicht einander zugeordnet werden, und eines Ablaufgenerators (10), an den die, einem Einzelabtragungsgebiet entsprechenden, in Blöcken zusammengefaßten, vom Blockgenerator (9) erzeugten Daten weitergeleitet werden und in dem die ...



DE 197 27 573 C 1

DE 197 27 573 C 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Formgebung von Oberflächen, insbesondere von Linsen, mittels einer Laserabtragung der Oberflächen, insbesondere, jedoch nicht ausschließlich, von Oberflächen biologischer Materialien. Bevorzugt findet die Erfindung Anwendung bei der Photo Refraktiven Keratotomie (PRK) und ophthalmologisch exakten Formung von Kontaktlinsen.

Der bekannte Stand der Technik soll im nachstehenden anhand des dem der Erfindung am nächsten kommenden beschrieben werden, der sich mit der Korrektur von Fehlsichtigkeit befaßt.

Die seit Mitte der 80er Jahre durchgeföhrten ablativen Verfahren zur Behandlung von Fehlsichtigkeiten am menschlichen Auge beruhen alle auf den erstmals von Munnerlin beschriebenen Formeln für die Berechnung der nötigen Abflachung bzw. Aufstellung der Hornhaut. Im Falle der Korrektur einer Kurzsichtigkeit wird gemäß dieser Berechnungen mehr Hornhautgewebe im Hornhautzentrum als im peripheren Bereich der Hornhaut entfernt. Im Falle der Korrektur von Weitsichtigkeit wird mehr Gewebe in der Hornhautperipherie als im Zentrum der Hornhaut abgetragen. Der dadurch auf die Brechkraft der Hornhautoberfläche entstehende verstärkende oder abschwächende Effekt entspricht in seiner Wirkung dem einer Kontaktlinse.

Die Entfernung der entsprechenden Hornhautmenge erfolgt bei allen bekannten, der Erfindung nahe kommenden Verfahren in einzelnen, aufeinanderfolgenden Bereichen von sich stetig verändernden Arealen. Im theoretisch einfachsten Fall, einer Korrektur sphärischer Myopie, werden diese Areale durch aufeinanderfolgende Kreise mit stetig kleiner oder größer werdenden Durchmessern beschrieben. Für die Erzielung eines optimalen Behandlungsergebnisses ist es notwendig, alle Schichten einer Serie komplett abzuarbeiten.

Kennzeichnend für die derzeitig bekannten Verfahren ist, daß diese Serien immer vom Beginn bis zum Ende in stetig steigender oder fallender Reihenfolge abgearbeitet werden. Kommt es bei diesen Verfahren zu einem ungewollten Behandlungsabbruch, entstehen unregelmäßige Hornhautoberflächen, die in der Regel zu einer deutlichen Verschlechterung des Sehvermögens führen. Leider lassen sich so verursachte Sehfehler mit konventionellen Mitteln, wie einer Brille oder Kontaktlinse, nicht oder nur unzureichend beheben. Einziger Ausweg ist es, die Behandlung an genau dem Punkt fortzusetzen, an dem sie unterbrochen wurde. Kann der genaue Punkt der Behandlungsunterbrechung nicht festgestellt werden oder ist der Patient nicht bereit, eine weitere Behandlung über sich ergehen zu lassen, kommt es zu einer dauernden Verschlechterung des Sehvermögens.

Eine umfassende Beschreibung des bislang bekannten Standes der Technik ist in EP 412 789 A1 (entspricht DE 690 24 558 T2) abgehandelt.

In US-PS 5,520,679 ist eine ophthalmologische Operationsmethode unter Verwendung eines Spot Scanning Lasers beschrieben, bei der der Hornhautabtrag durch Setzen einzelner Laserspots erfolgt. Bei diesem Verfahren, das im übrigen wie die o.g. Abtragverfahren durchgeführt wird, wird versucht, einen flächenmäßig möglichst gleichmäßigen Abtrag dadurch zu erzielen, daß zeitlich unmittelbar aufeinanderfolgende Laserspots mit einem definierten Überlappungsverhältnis gesetzt werden. Dies bedingt jedoch, insbesondere bei Einsatz eines Erbium-Lasers eine erhöhte thermische Belastung einzelner Flächenareale.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Formgebung von Oberflächen, insbesondere von Linsen und hierbei insbesondere von

Oberflächen biologischer Materialien unter Verwendung eines Lasers mit gepulstem Laserausgangsstrahl anzugeben, die gewährleisten, daß bei einem plötzlichen gewollten oder ungewollten Oberflächenbearbeitungsabbruch wenigstens eine akzeptable Teilkorrektur der zu bearbeitenden Oberfläche vorliegt, die einer Verbesserung der Verhältnisse des Ausgangszustandes darstellt. Weiterhin ist es Aufgabe der Erfindung, die thermische Belastung, insbesondere bei Verwendung eines Erbium-Lasers, der zu bearbeitenden Oberfläche weitestgehend zu reduzieren.

Die Aufgabe wird durch die kennzeichnenden Merkmale der Patentansprüche 1 und 8 gelöst. Vorteilhafte weitere Ausgestaltungen sind in den jeweils nachgeordneten Ansprüchen erfaßt.

- 15 Bei dem hier vorgestellten Verfahren und der zum Einsatz gelangenden Vorrichtung werden die einzelnen Schichten einer zu bearbeitenden Oberfläche in einer vorbestimmten Reihenfolge abgetragen, um das Risiko einer Verschlechterung des Sehvermögens bei unvorhergesehenen Behandlungsabbrüchen zu minimieren. Anstelle einer Bearbeitung, bei der erst am Ende eine optisch einwandfreie, sphärische Hornhautoberfläche mit der gesamten, angestrebten Korrektur entsteht, werden beim vorgeschlagenen Verfahren unter Verwendung der vorgeschlagenen Vorrichtung möglichst viele Teilkorrekturen mit akzeptablen Zwischenergebnissen erzeugt. Bei einem plötzlichen Behandlungsabbruch kommt es deshalb nie zu stark unregelmäßigen bearbeiteten Oberflächen. In solch einem Fall wird zwar nicht die volle, durch die Bearbeitung angestrebte Korrektur erreicht, doch der verbleibende Sehfehler kann wesentlich einfacher mit einer Brille oder Kontaktlinse behoben werden. Darüber hinaus kann zu einem späteren Zeitpunkt eine erneute PRK wesentlich unkomplizierter, auch mit nach anderen Verfahren arbeitenden Geräten vorgenommen werden.
- 20 Die beschriebene Vorrichtung und das beschriebene Formgebungsverfahren eignen sich für alle derzeit verwendeten PRK-Methoden wie Area Ablation, Slit Scanning und Small Spot Scanning, sowohl bei Ablationen auf der Hornhautoberfläche als auch intrastromale Gewebeabtragungen
- 25 in Verbindung mit der LASIK-Methode oder Pikosekunden Lasern.
- 30 Das vorgeschlagene Verfahren unterscheidet sich von der bei nach dem Area Ablation Prinzip arbeitenden Geräten gelegentlich verwendeten Multi Pass Methode dadurch, daß hier bewußt sehr viele, möglichst kleine Teilkorrekturen erzeugt werden. Beim Multi Pass erfolgt typischerweise nur eine Aufteilung in 2-3 Teilkorrekturen. Außerdem wird mit der Multi Pass Technik in erster Linie versucht, bestimmte für die Area Ablation typische Nebeneffekte, wie einer zu
- 35 starken Austrocknung, einer zu starken Gewebeerwärmung und der Entstehung von Central Islands zu reduzieren.
- 40 Die Erfindung soll nachstehend anhand eines schematischen Ausführungsbeispiels näher erläutert werden. Es zeigen:

Fig. 1 blockschaltbildartig die wesentlichen Komponenten einer erfindungsgemäßen Vorrichtung sowie ihre funktionelle Zuordnung zueinander,

Fig. 2 beispielhaft die Abfolge erforderlicher Bearbeitungsschritte für eine Myopie Korrektur im Falle der Anwendung des sogenannten Small Spot Scanning nach dem Stand der Technik und

Fig. 3 eine Möglichkeit der erfindungsgemäßen Abfolge erforderlicher Bearbeitungsschritte für eine Myopie Korrektur ebenfalls im Falle der Anwendung des Small Spot Scanning.

In Fig. 1 sind blockschaltbildartig die wesentlichen Komponenten der vorgeschlagenen Vorrichtung dargestellt. Zunächst besteht die Vorrichtung aus einem an sich bekannten,

zum Laserscanning eingesetzten gepulsten Laser 1. Für diesen Laser kommen Laser mit gepulstem Laserausgangsstrahl, bspw. UV-Laser, wie Excimerlaser, Er:YAG-Laser oder gütegeschaltetem Laser für den vorgesehenen Verwendungszweck geeigneter Wellenlänge und Intensität bzw. Energie in Betracht. Dem Laser 1 ist eine Strahlformungseinheit 2 nachgeordnet, die, wie nach dem Stand der Technik bekannt, aus Linsen, Spiegeln und Prismen gebildet ist. Weiterhin ist eine, auf die Laserimpulsfolge abgestimmte Laserstrahlablenkeinheit 3 vorgesehen, die die Laserstrahlung definiert auf die zu bearbeitende Oberfläche 4 ablehnt. Die Laserstrahlablenkeinheit 3 und die Strahlformungseinheit 2 sind mit einer Ansteuereinheit 5 in Verbindung gebracht. Zum definierten Ansteuern der Ansteuereinheit 5 ist zunächst eine erste Eingabeeinheit 6 vorgesehen, die die refraktiven Eingangsgrößen (z. B. dpt, sph, zyl) der zu bearbeitenden Oberfläche 4 aufnimmt. Diese Ausgangsparameter sind zunächst auf übliche Weise, unabhängig von der Bearbeitungsvorrichtung, zu ermitteln. Weiterhin ist eine zweite Eingabeeinheit 7 vorgesehen, welche vornehmlich zur Aufnahme laserrelevanter Daten dient. Solche Daten betreffen den Laserstrahldurchmesser, die Energiedichte des Laserstrahls und die Energieverteilung über den Laserstrahlquerschnitt und einen Überlappungsfaktor, welche einzeln als auch in ihrer Gesamtheit variabel vorgebbar sind. Diesen beiden Eingabeeinheiten 6, 7 ist eine Berechnungseinheit 8 zugeordnet, innerhalb derer, alle erforderlichen Lasereinzelschusskoordinaten in Abhängigkeit von der gesamt abzutragenden Oberfläche 4 einander zugeordnet werden. Das heißt, dort wird ermittelt und festgelegt, wieviele Laserspots in welchem Teilgebiet der abzutragenden Oberfläche in Abhängigkeit der Laserparameter zu setzen sind, um die Oberfläche 4 in den gewünschten Sollzustand zu überführen. Der Berechnungseinheit 8 ist ein sogenannter Blockgenerator 9 nachgeordnet, dem die Daten der Berechnungseinheit 8 zugeführt werden, und in dem die Einzellaserschusskoordinaten zur Abtragung jeweils einer beliebig vorgebaren abzutragenden Einzeleroberflächenschicht (vgl. bspw. Fig. 3 ein beliebiges, durch einen Step x erfasstes Gebiet) in solcher Weise einander zugeordnet werden (in Blöcke zusammengefaßt werden), daß zeitlich unmittelbar aufeinanderfolgende Laserspots im Einzelabtragungsgebiet in der Folge voneinander so beabstandet gesetzt werden, daß sie keine Überlappung erfahren, was vorteilhaft über eine Zufallsverteilung erreicht wird und bei der Durchführung des Verfahrens den Vorteil nach sich zieht, daß die thermische Belastung im Abtragungsgebiet minimiert wird. Dem Blockgenerator 9 ist schließlich ein Ablaufgenerator 10 nachgeordnet, in dem die einzelnen, im Blockgenerator 9 gebildeten Blöcke zusammengefaßt und in eine der Erfindung zugrundeliegende Reihenfolge gebracht werden. Diese Reihenfolge stellt jeweils eine Blocksequenz dar, die anhand von Fig. 3 den Bearbeitungsstellschritten (Step1 bis 6; 7-12; 13-18; 19-24; 25-30; 31-36; 37-42; 43-48; 49-54) entspricht. Jeder dieser Bearbeitungsstellschritte stellt dabei in sich eine vollständige Teilkorrektur dar. Die durch das Zusammenwirken bisher genannter Einheiten vom Ablaufgenerator 10 an die Ansteuereinheit 5 gesandte definierte Blocksequenz dient zum einen der Ansteuerung der Laserstrahlablenkeinheit 3 und zum anderen der Ansteuerung der Strahlformungseinheit 2 und dort insbesondere zur Ansteuerung einer in der Strahlformungseinheit 2 vorgesehenen, in ihrer Öffnung veränderbaren Blende 21, deren Funktion beim Ablauf des Verfahrens näher erläutert wird. Weiterhin ist eine Zentralrechnereinheit 11 vorgesehen, die in Abhängigkeit von den die Ansteuereinheit 5 verlassenden Ansteuerdaten die Zuschaltung und Steuerung zumindest der Lasereinheit 1, der Strahlformungseinheit 2; 21 und der Laser-

strahlablenkeinheit 3 in vorgebbare Weise koordiniert.

Es liegt im Rahmen der Erfindung, die erste und zweite Eingabeeinheit 6; 7, die Berechnungseinheit 8, den Blockgenerator 9, den Ablaufgenerator 10 und die Ansteuereinheit 5 einer zweiten, mit dem Zentralrechner 11 in Verbindung stehenden Rechnereinheit zuzuordnen. Auch ist es möglich, die genannten Einheiten im Zentralrechner 11 zu integrieren.

Zusätzlich zu den bis hierher beschriebenen Einheiten ist 10 vorteilhaft eine Überwachungseinheit 12 vorgesehen, die zufällige Auslenkbewegungen der zu bearbeitenden Oberfläche 4 erfaßt und über die Ansteuereinheit 5 entsprechende Korrektursignale an die Laserstrahlablenkeinheit 3 weiterleitet. Eine solche Überwachungseinheit ist z. B. von A. Unkroth et al. in "Corneal surgery by two-dimensionally scanning of a low-energy excimer laser beam" SPIE Vol. 2126 Ophthalmic Technol. IV 1994 S. 217ff. beschrieben.

Zum besseren Verständnis des erfundungsgemäßen Verfahrens soll zunächst Fig. 2, die beispielhaft die Abfolge erforderlicher Bearbeitungsschritte für eine Myopie Korrektur im Falle der Anwendung des sogenannten Small Spot Scanning nach dem Stand der Technik darstellt, erläutert werden. Gemäß Fig. 2 sind die einzelnen Ablationsschichten in stetigen Reihen angeordnet, wie sie bei einer Behandlung von sphärischer Kurzsichtigkeit im Small Spot Scanning verwendet würden. Die einzelnen Punkte kennzeichnen die Mittelpunkte der einzelnen Laserablationen eines kreisförmigen Laserstrahles mit etwa 1-2 mm Durchmesser. Bei geeignetem Überlappungsfaktor und geeignetem, z. B. gaußförmigen Strahlprofil ergibt sich aus all den einzelnen Laserschüssen pro Schicht jeweils ein bzgl. der zu erzeugenden Korrektur irgendwie gearteter, jedoch möglichst refraktiv gleichmäßiger Gewebeabtrag innerhalb eines Areals. Bei der Area Ablation Methode entspräche ein solches Areal jeweils einem einzigen Laserpuls. Erst nach Abfolge aller, im Beispiel nach Fig. 2 vierundfünfzig Steps, von denen jeder einen Abtrag einer Schicht darstellt, ist die gewünschte Korrektur mit einem in der Mitte stärkeren Gewebeabtrag erreicht. Jeder Abbruch der Oberflächenformung vor Erreichen des letzten Bearbeitungsschrittes ist hier mit den oben beschriebenen Nachteilen verbunden.

Im Gegensatz dazu, steht das vorgeschlagene erfundungsgemäße Verfahren, welches anhand einer Abfolge erforderlicher Bearbeitungsschritte für eine Myopie Korrektur unter 45 Einsatz des Small Spot Scanning, wie in Fig. 3 dargestellt, beschrieben werden soll. In Fig. 3 ist die beim Verfahren verwendete Folge der einzelnen Ablationsschichten dargestellt. Dabei bildet jeweils eine gemäß der Erfindung zusammengefaßte Serie von Schichtabtragungen (vgl. Step1 bis 6; 7-12; 13-18; 19-24; 25-30; 31-36; 37-42; 43-48; 49-54) jeweils eine eigene Teilkorrektur. Die genaue Anzahl der Schichten pro Teilkorrektur läßt sich in bestimmten Bereichen verändern. Zum einen sollte eine Mindestanzahl von Schichten nicht unterschritten werden damit eine theoretische Annäherung an eine sphärische Oberfläche überhaupt möglich ist. Zum anderen sollte der refraktive Effekt der Teilkorrektur so gering wie möglich gehalten werden, um bei einem Behandlungsabbruch entstehende Restunregelmäßigkeiten in einem vertretbar geringem refraktiven Rahmen zu halten.

Als sinnvoll erscheint eine Mindestzahl von 5 Schichten und eine bestimmbare Höchstzahl, die einer Korrektur von annähernd einer halben Dioptrie entspräche. Bei einer Ablationstiefe von 9 µm pro dpt für eine 5 mm Myopie Behandlung und einer typischen Schichtdicke von 0.3 µm wären dies bspw. 15 Schichten.

Unter Verwendung eines Lasers 1 mit gepulstem Laserausgangsstrahl, bspw. einem UV-Laser, wie Excimerlaser,

Er:YAG-Laser oder gütegeschaltetem Laser für den vorgesehenen Verwendungszweck geeigneter Wellenlänge und Intensität bzw. Energie und der Verwendung von auf die Laserimpulsfolge abgestimmten Laserstrahlablenkeinheit 3, die durch ansteuerbare Kippspiegel o. ä. gebildet sein kann, wird im Bearbeitungsgebiet ein Setzen von Laserspots derart vorgenommen, daß in Abhängigkeit vom zu bearbeitenden, vom Sollwert abweichenden Linsenprofil (Myopie, Hyperopie, Astigmatismus, Cornea-Narben o. ä.) folgende Schritte ausgeführt werden:

- a) in einem ersten vorgegebenen Gebiet werden mehrere Laserspots nacheinander, flächenmäßig möglichst gleichmäßig, jedoch zufällig verteilt gesetzt,
- b) in einem gegenüber dem ersten Gebiet vergrößerten oder verkleinerten zweitem Gebiet, analog zum ersten Gebiet wiederum mehrere Einzellaserspots mit der gleichen Maßgabe wie unter a), jedoch zu den Einzellaserspots des ersten Gebietes versetzt und in gleicher oder veränderter Anzahl gesetzt werden,
- c) der Vorgang des Laserspotsetzens in n Gebieten, wobei n zumindest fünf betragen soll, jeweils mit den Maßgaben nach a) und b) solange fortgesetzt wird, bis flächenmäßig das gesamte Bearbeitungsgebiet zu einem ersten Mal erfaßt und weitestgehend refraktiv gleichmäßig abgetragen ist,
- d1) an dieser Bearbeitungsstufe ein ggf. erforderlicher Abbruch des Abtragungsverfahrens vorgenommen wird, wodurch wenigstens eine optische Teilkorrektur realisiert ist, oder
- d2) die Bearbeitungsschritte nach a) bis c) wiederholt solange fortgeführt werden, bis ein gleichmäßiger, dem angestrebten Sollwert der Oberfläche entsprechender Abtrag des gesamten Bearbeitungsgebietes erreicht ist, wodurch ein refraktiver, insbesondere sphärischer Abtrag der zu bearbeitenden Oberfläche 4 erreicht wird.

Vergleicht man **Fig. 3**, ist zu erkennen, daß in einem ersten Schritt (Step1) zeitlich aufeinanderfolgend vier Laserspots entsprechend der Maßgabe a) gesetzt werden. Das heißt also nach dem Setzen des jeweils aktuellen Laserspots erfolgt vorzugsweise erst das jeweilige Setzen weiter von ihm entfernter Laserspots, wodurch eine lokale Überhitzung, infolge des Setzens mehrerer Spots in einem kleinen Areal, wirkungsvoll verhindert wird. Bevorzugt wird erst bei den jeweils folgenden Abtragungsschichten (Step2, ..., n) eine teilweise Überlappung vorheriger Abtragungsbereiche durch die Ansteuereinheit 5 zugelassen. In dem sich an Step1 anschließenden zweiten Bearbeitungsschritt (Step2) werden mehrere Laserspots in einem etwas vergrößerten Gebiet gesetzt, wobei die entsprechend Step1 mittig gesetzten vier Laserspots im Beispiel bei Step2 bereits versetzt zu den nach Step1 gesetzt werden. Betrachtet man im weiteren nur die im mittleren Areal nach Step1 gesetzten Laserspots (vgl. Step3 bis 6), so ist zu erkennen, daß im weiteren auch die Anzahl der Laserspots und ihre Koordinaten verändert werden. Das gleiche gilt ebenso für die das mittige Areal umgebenden weiteren Areale. Die erzeugte erste Folge (Step1 bis 6) von Abtragungsschritten ergibt danach bereits eine erste optische Teilkorrektur, bei der gemäß der Maßgabe d1) ggf. ein erforderlicher Abbruch des Formgebungsverfahrens ohne nachteilige Wirkungen erfolgen könnte. Betrachtet man in **Fig. 3** das beispielhaft erläuterte Verfahren bis zum letzten Bearbeitungsschritt in den einzelnen Blocksequenzen, so ist zu erkennen, daß durch eine ständige Veränderung der Anzahl und der Koordinaten der einzelnen Laserspots im Ergebnis ein gleichförmiger Materialabtrag, mit einem in den mittigen Arealen höheren Abtrag, da dort

bei jedem Step Laserspots gesetzt werden, erzielt wird. Bei entsprechender Verfahrensführung kann somit im Beispiel eine exakte sphärische Linsenkorrektur durchgeführt werden.

- 5 Weiterhin liegt es im Rahmen der Erfindung, daß das Formgebungsverfahren bei Variation des Laserspotdurchmessers und/oder der Laserstrahldiedichte und/oder des Laserspotprofils während der Durchführung der Verfahrensschritte nach den Maßgaben a) bis c) durch eine entsprechende Ansteuerung des Lasers 1 und/oder der Strahlformungseinheit 2 zunächst wenigstens einmal mit ersten Parametern ausgeführt wird, woran anschließend die Verfahrensschritte nach a) bis c) mit veränderten Parametern solange wiederholt durchgeführt werden, bis ein, einer Teilkorrektur 15 entsprechender Bearbeitungszustand nach der Maßgabe d1) oder eine vollständige Korrektur nach der Maßgabe d2) erreicht wird.

Es liegt im besonderen im Rahmen der Erfindung, Laserspots mit unterschiedlichen Spotdurchmessern zu verwenden. Vorteilhafter Weise wird mindestens ein Bearbeitungszyklus a) bis c) mit einem großen Laserspotdurchmesser und weitere mit kleineren Laserspotdurchmessern durchgeführt. Die Kombination von Bearbeitungszyklen mit unterschiedlichen Laserspotdurchmessern sichert sowohl die Realisierung kurzer Bearbeitungszeiten, als auch einen Formgebungsabtrag entsprechend der gewünschten Parameter. Gelangt also bspw. während des Fcinaabtrags ein Laserstrahl mit einem Durchmesser von 1 mm zur Anwendung, kann vorher zumindest in solchen Gebieten, in denen ein größerer Abtrag erforderlich ist, wenigstens einmal ein Formgebungsabtrag entsprechend der Maßgaben nach a) bis c) mit einem größeren Laserstrahldurchmesser, bspw. mit 2 mm, durchgeführt werden.

In einer weiteren Ausführung läßt sich die Verkürzung 35 der Bearbeitungszeit bei gleichzeitiger Sicherung der gewünschten Abtragung dadurch realisieren, daß zwischen Laser 1 und zu bearbeitender Oberfläche 4 ein die Energiedichte der Laserstrahlung beeinflussendes Element angeordnet ist. Ein solches Element kann z. B. ein mechanischer oder variabler optischer Abschwächer sein. Auch liegt es im Rahmen der Erfindung mindestens einen Bearbeitungszyklus a) bis c) mit hoher Energiedichte und weitere mit niedriger Energiedichte durchzuführen.

Die Erfindung ist nicht auf die beschriebenen Ausführungsbeispiele begrenzt. So liegt es z. B. ebenso im Rahmen der Erfindung, daß einzelne Abtragungsgebiete mittels der Strahlformungseinheit 2; 21 und/oder der Laserstrahlablenkeinheit 3 durch in sich geschlossene Ringbahnen oder zeilenartige Abtragungszonen gebildet werden, wodurch 40 sich durch das erfindungsgemäße Abtragungsverfahren im Grunde beliebige, vom sphärischen Sollwert abweichende Linsenkorrekturen vornehmen lassen.

Für die im Rahmen der Erfindung eingesetzten Laser kommen die für die PRK bzw. das LASIK-Verfahren vorgeschlagenen Laser in Betracht. Vorzugsweise ist der Laser ein Excimerlaser der Wellenlänge 193 nm oder ein Er:YAG-Laser der Wellenlänge 2940 nm. Bei Verwendung eines Excimerlasers beträgt die auf der zu bearbeitenden Oberfläche applizierte Energiedichte in einer erfindungsgemäßen Ausführung vorzugsweise 100–300 mJ/cm<sup>2</sup>. Der Laserspot auf der zu bearbeitenden Oberfläche 4 ist weitgehend kreisrund und besitzt für mindestens eine Abtragungsschicht einen Laserspotdurchmesser von 3 mm. Weitere Schichten werden mit einem Laserspotdurchmesser von 1 mm abgetragen. Das Strahlprofil kann hier insbesondere eine gaußförmige Verteilung aufweisen, aber auch eine topfförmige Verteilung ist möglich. Es liegt im besonderen im Rahmen der Erfindung, den großflächigen Abtrag mit einer gaußförmigen Vertei-

lung vorzunehmen und die Verteilung beim kleineren Durchmesser topfförmig zu wählen. Eine solche Kombination erlaubt es in besonderer Weise, sowohl einen kontinuierlichen Übergang in das unbehandelte Gebiet zu realisieren, als auch Unregelmäßigkeiten der Cornea, wie z. B. Narben zu behandeln.

Es liegt ausdrücklich im Rahmen der Erfindung, die beschriebene Methode zur ophthalmologisch exakten Formung von Kontaktlinsen anzuwenden.

#### Bezugszeichenliste

- 1 Lasereinheit
- 2 Strahlformungseinheit
- 21 Blende
- 3 Laserstrahlablenkeinheit
- 4 zu bearbeitende Oberfläche
- 5 Ansteuereinheit
- 6 erste Eingabeeinheit
- 7 zweite Eingabeeinheit
- 8 Berechnungseinheit
- 9 Blockgenerators
- 10 Ablaufgenerator
- 11 Zentralrechnereinheit
- 12 Überwachungseinheit

#### Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Formgebung von Oberflächen, insbesondere von Linsen, vermittels Laserabtrag, enthaltend einen üblichen zum Laserscanning eingesetzten gepulsten Laser (1) geeigneter Wellenlänge und Energiedichte, eine Strahlformungseinheit (2) und eine auf die Laserimpulsfolge abgestimmte Laserstrahlablenkeinheit (3), die den Laserstrahl auf eine zu bearbeitende Oberfläche (4) ablenkt, wobei die Laserstrahlablenkeinheit (3) und die Strahlformungseinheit (2) von einer Ansteuereinheit (5) durch das Zusammenwirken
    - einer ersten Eingabeeinheit (6), die alle Ausgangsparameter der zu bearbeitenden Oberfläche beinhaltet,
    - einer zweiten Eingabeeinheit (7), in die vornehmlich laserrelevante Daten, wie Laserstrahl-durchmesser, Energiedichte, Energieverteilung und ein zulässiger Überlappungsfaktor einzelner Laserspots eingebbar sind,
    - einer Berechnungseinheit (8), der die Daten der ersten und zweiten Eingabeeinheiten (6; 7) zugeführt werden und innerhalb derselben alle erforderlichen Lasereinzelschusskoordinaten in Abhängigkeit von der gesamten abzutragenden Oberfläche (4) einander zugeordnet werden,
    - eines Blockgenerators (9), dem die in der Berechnungseinheit (8) gewonnenen Daten zugeführt werden und in dem die Einzellaserschusskoordinaten zur Abtragung jeweils einer beliebig vorgebaren abzutragenden Einzeloberflächenschicht einander zugeordnet werden, und
    - eines Ablaufgenerators (10), an den die, einem Einzelabtragungsgebiet entsprechenden, in Blöcken zusammengefaßten, vom Blockgenerator (9) erzeugten Daten weitergeleitet werden und in dem die einzelnen Blöcke zusammengefaßt und in eine vorgebbare Reihenfolge gebracht werden,
- derart ansteuerbar sind, daß eine vom Ablaufgenerator (10) gesandte bestimmte Blocksequenz auf die Laserstrahlablenkeinheit (3) und auf eine Strahlformungseinheit (2) in der Weise einwirken, daß pro Blockse-

quenz jeweils eine vollständige Teilkorrektur der zu bearbeitenden Oberfläche (4) gewährleistet ist und weiterhin eine Zentralrechnereinheit (11) vorgesehen ist, die in Abhängigkeit von den von der Ansteuereinheit (5) verlassenden Ansteuerdaten die Zuschaltung und Steuerung zumindest der Lasereinheit (1), der Strahlformungseinheit (2; 21) und der Laserstrahlablenkeinheit (3) in vorgebbarer Weise koordiniert.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlformungseinheit (2) mindestens ein Element enthält, das die Größe und/oder die Energiedichte und/oder das Profil des Laserspots auf der zu bearbeitenden Oberfläche (4) verändert.
3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß es sich bei dem Element in der Strahlformungseinheit (2) um eine Blende (21) handelt.
4. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß es sich bei dem Element in der Strahlformungseinheit (2) um einen Abschwächer handelt.
5. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß weiterhin eine Überwachungseinheit (12) vorgesehen ist, die zufällige Auslenkbewegungen der zu bearbeitenden Oberfläche (4) erfaßt und über die Ansteuereinheit (5) entsprechende Korrektursignale an die Laserstrahlablenkeinheit (3) weiterleitet.
6. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die erste und zweite Eingabeeinheit (6; 7), die Berechnungseinheit (8), der Blockgenerator (9), der Ablaufgenerator (10) und die Ansteuereinheit (5) einer zweiten, mit dem Zentralrechner (11) in Verbindung stehender Rechnereinheit zugeordnet sind.
7. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die erste und zweite Eingabeeinheit (6; 7), die Berechnungseinheit (8), der Blockgenerator (9), der Ablaufgenerator (10) und die Auswerteeinheit (5) im Zentralrechner (11) integriert sind.
8. Verfahren zur Formgebung von Oberflächen, insbesondere von Linsen, vermittels Laserabtrag, unter Einsatz einer Vorrichtung nach den vorstehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß in Abhängigkeit von der zu bearbeitenden, vom angestrebten Sollwert abweichenden Oberfläche
  - a) in einem ersten vorgegebenen Gebiet mehrere Laserspots nacheinander, flächenmäßig möglichst gleichmäßig, jedoch zufällig verteilt gesetzt werden,
  - b) in einem gegenüber dem ersten Gebiet vergrößerten oder verkleinerten zweitem Gebiet, analog zum ersten Gebiet wiederum mehrere Einzellaserspots mit der gleichen Maßgabe wie unter a), jedoch zu den Einzellaserspots des ersten Gebietes versetzt und in gleicher oder veränderter Anzahl gesetzt werden,
  - c) der Vorgang des Laserspotsetzens in n Gebieten, wobei zumindest fünf betragen soll, jeweils mit den Maßgaben nach a) und b) solange fortgesetzt wird, bis flächenmäßig das gesamte Bearbeitungsgebiet zu einem ersten Mal erfaßt und weitestgehend refraktiv gleichmäßig abgetragen ist,
  - d1) an dieser Bearbeitungsstufe ein ggf. erforderlicher Abbruch des Abtragungsverfahrens vorgenommen wird, wodurch wenigstens eine optische Teilkorrektur realisiert ist oder
  - d2) die Bearbeitungsschritte nach a) bis c) wiederholt solange fortgeführt werden, bis ein gleichmäßiger, dem angestrebten Sollwert der Oberfläche entsprechender Abtrag des gesamten Bearbeitungsgebietes erreicht ist.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß zeitlich aufeinanderfolgende Einzellaserspots voneinander deutlich so beabstandet gesetzt werden, daß die pro Laserspot erzeugten Abtragungsgebiete keine Überlappung aufweisen.

5

10. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß innerhalb eines Teilbearbeitungszyklus, bis flächenmäßig das gesamte Bearbeitungsgebiet zu einem ersten Mal erfaßt und weitestgehend refraktiv gleichmäßig abgetragen ist, vorgebbare Teilgebiete mehr als einmal einem Laserspotabtrag ausgesetzt werden.

10

11. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Formgebungsverfahren bei Variation des Laserspottdurchmessers und/oder der Laserstrahlergiedichte und/oder des Laserspotprofils während der Durchführung der Verfahrensschritte nach a) bis c) durch eine entsprechende Ansteuerung des Lasers (1) und/oder der Strahlformungseinheit (2) zunächst wenigstens einmal mit ersten Parametern ausgeführt wird, woran anschließend die Verfahrensschritte nach a) bis c) mit veränderten Parametern solange wiederholt durchgeführt werden, bis ein Bearbeitungszustand nach dem Verfahrensschritt d1) oder d2) erreicht wird.

15

12. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest in solchen Gebieten, in denen ein größerer Abtrag erforderlich ist, wenigstens einmal die Bearbeitungsschritte a) bis c) mit einem größeren Laserstrahldurchmesser durchgeführt werden, woran anschließend die Schritte a) bis c) solange mit einem kleineren Laserstrahldurchmesser wiederholt durchgeführt werden, bis ein Bearbeitungszustand nach d1) oder d2) erreicht ist.

25

13. Verfahren nach Anspruch 8 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß einzelne Abtragungsgebiete vermittels der Strahlformungseinheit (2; 21) und/oder der Laserstrahlablenkeinheit (3) durch in sich geschlossene Ringbahnen gebildet werden.

35

14. Verfahren nach Anspruch 8 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß einzelne Abtragungsgebiete vermittels der Strahlformungseinheit (2; 21) und/oder der Laserstrahlablenkeinheit (3) durch zeilenartige Abtragungszonen gebildet werden.

40

---

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

45

50

55

60

65

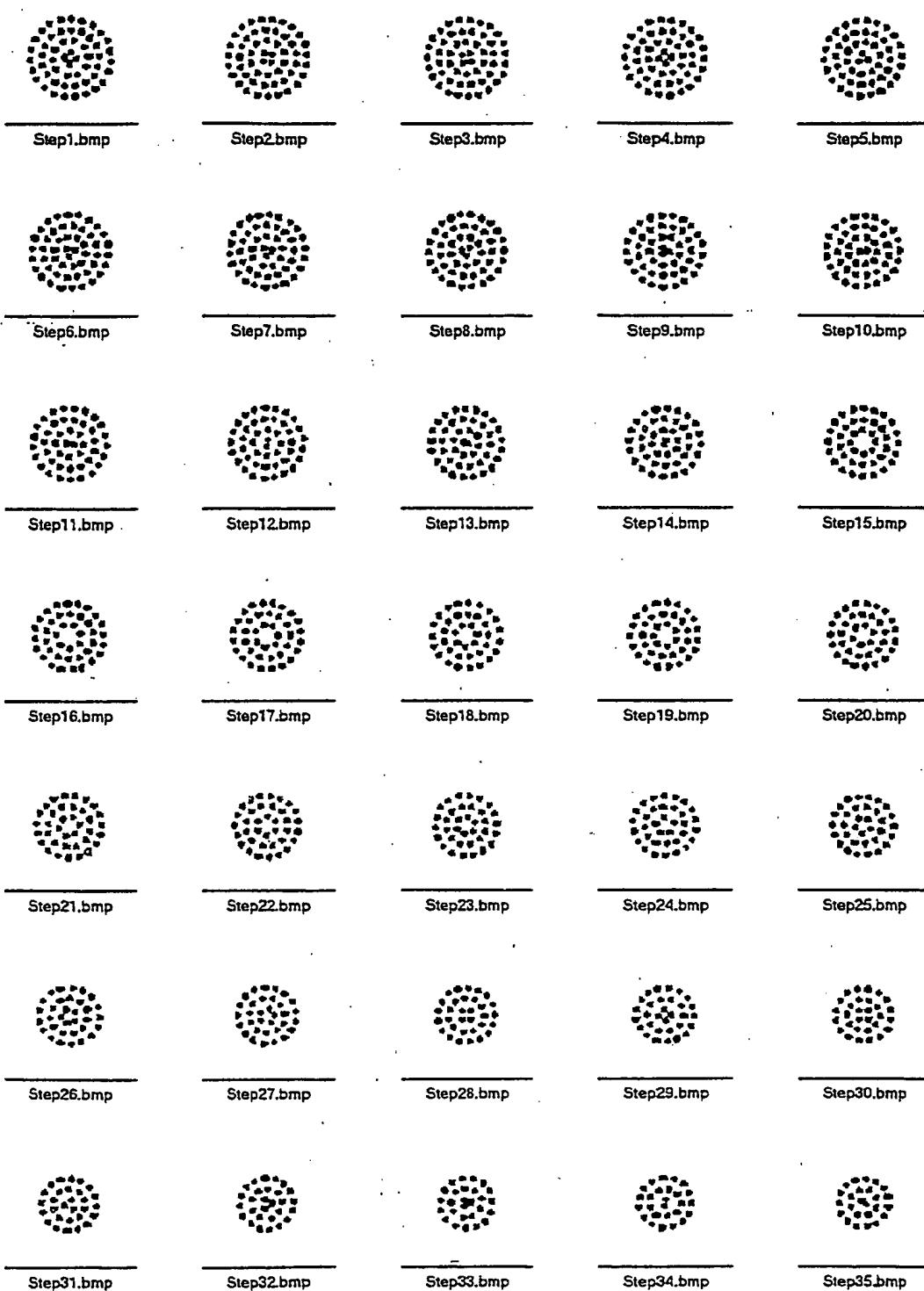


Fig. 2



Step36.bmp



Step37.bmp



Step38.bmp



Step39.bmp



Step40.bmp



Step41.bmp



Step42.bmp



Step43.bmp



Step44.bmp



Step45.bmp



Step46.bmp



Step47.bmp



Step48.bmp



Step49.bmp



Step50.bmp



Step51.bmp



Step52.bmp



Step53.bmp



Step54.bmp

Fortsetzung von Fig. 2

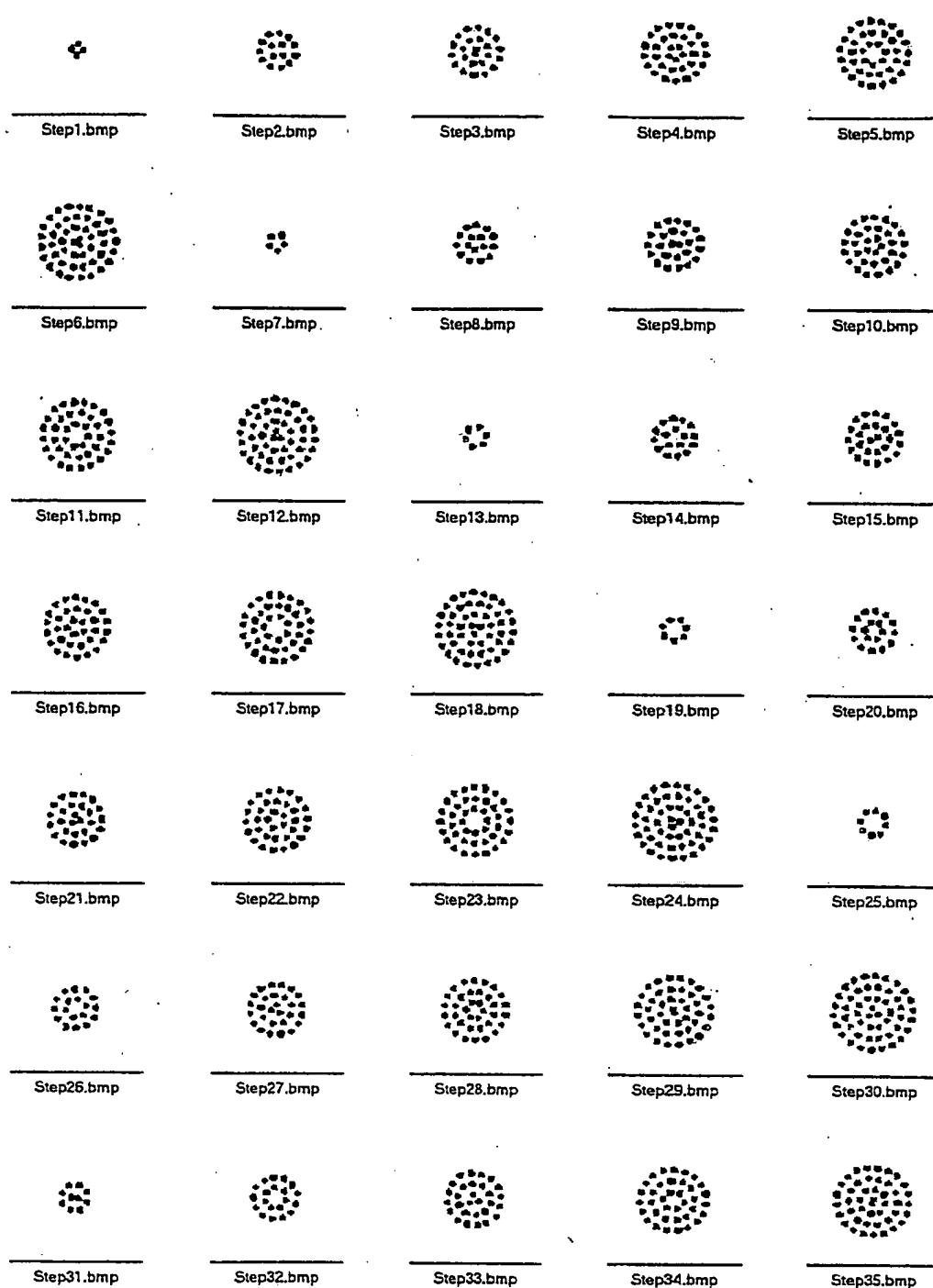
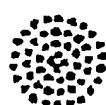


Fig. 3



Step36.bmp



Step37.bmp



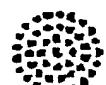
Step38.bmp



Step39.bmp



Step40.bmp



Step41.bmp



Step42.bmp



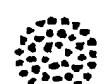
Step43.bmp



Step44.bmp



Step45.bmp



Step46.bmp



Step47.bmp



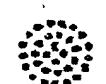
Step48.bmp



Step49.bmp



Step50.bmp



Step51.bmp



Step52.bmp



Step53.bmp



Step54.bmp

Fortsetzung von Fig. 3

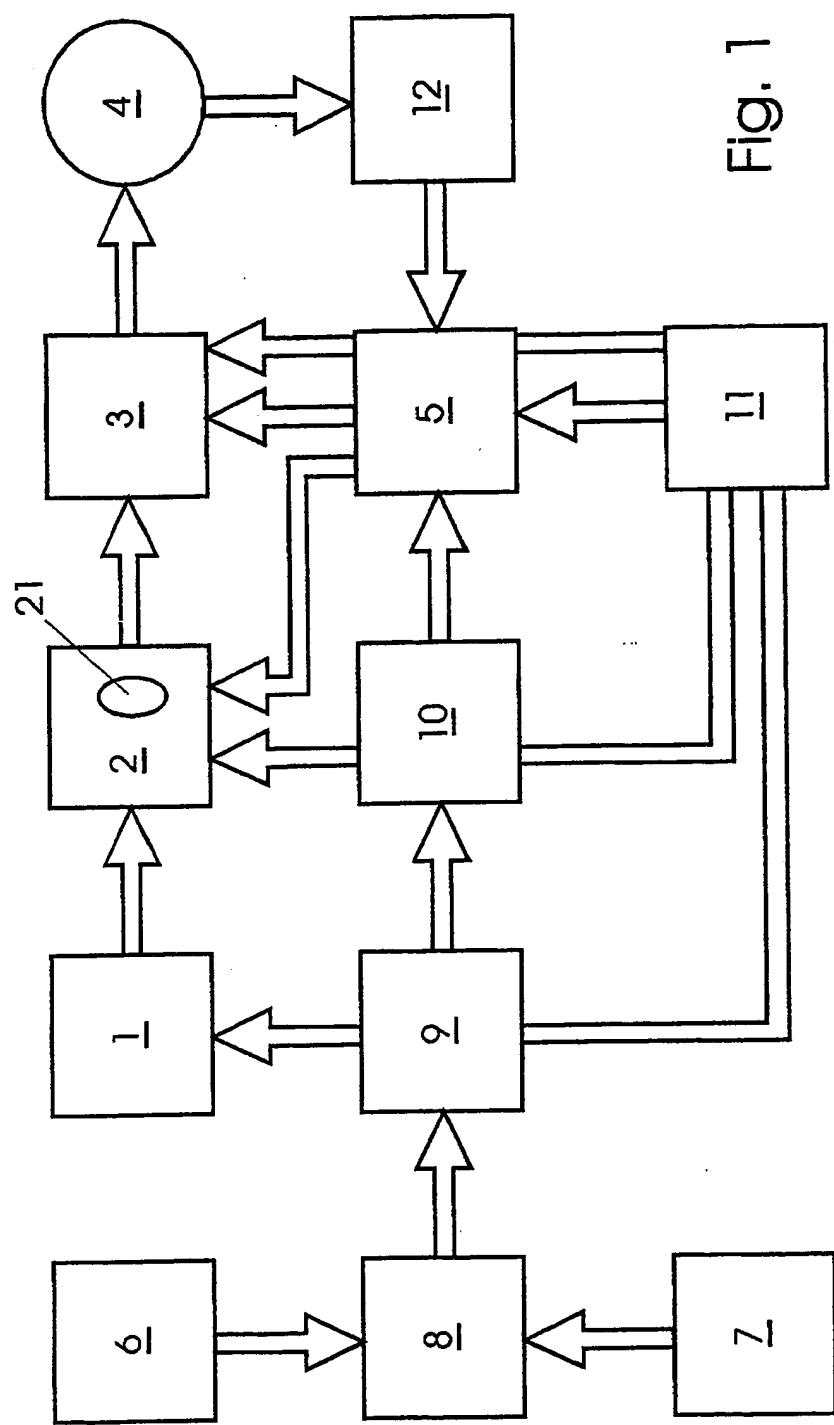


Fig. 1